МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 621.791.05:620.17 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-225-234

Аналитическая модель оценки предела выносливости сварных соединений феррито-перлитных сталей

К. А. Молоков, В. В. Новиков, А. П. Герман
ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (г. Владивосток, Российская Федерация)

Введение. Микродефекты и зоны с концентрацией напряжений в сварных соединениях обусловливают появление усталостных макротрещин. Такие повреждения потенциально опасны, особенно если ресурс усталостной прочности конструкции практически исчерпан. В этом случае размер трещины близок к критическому значению, и крайне важно определить ее длину. Статья посвящена разработке инженерной аналитической модели для оценки критической длины трещины и предела выносливости сварных соединений с образовавшимся зерном в структуре феррито-перлитных сталей после сварки.

Материалы и методы. Использованы теория и методы механики разрушения материалов на мезоуровне. Получена простая аналитическая зависимость, позволяющая определить критические размеры макротрещины для феррито-перлитных сталей без использования формулы Гриффитса. Приведены результаты расчета критических длин трещин различных сталей в зависимости от их предела текучести. Представлена аналитическая зависимость расчета предела выносливости для наиболее опасного симметричного цикла нагружения по стандартному набору механических характеристик и среднему диаметру зерна феррито-перлитной стали.

Результаты исследования. Выполнен структурно-деформационный анализ процесса развития трещин. На его базе разработана инженерная методика оценки предела выносливости. Создана математическая модель, которая позволяет рассчитывать предел выносливости и критическую длину трещины в элементах сварных конструкций крупногабаритной техники с учетом циклических нагрузок симметричного цикла. С помощью данной модели можно оценить степень чувствительности металла к исходным характеристикам (предел текучести, коэффициент Пуассона, диаметр зерна, относительное сужение, модуль Юнга, коэффициент степенного упрочнения и др.).

Обсуждение и заключение. При напряжениях, соответствующих пределу выносливости стали, сближаются скорости раскрытия критической трещины вершины и берегов. Этот момент энергетически примерно соответствует переходу трещины в нестабильное состояние. Накопление односторонних пластических деформаций приводит к предельному состоянию пластичности области, примыкающей к вершине трещины и лавинообразному или резко ускоренному ее движению. Эта критическая область взаимосвязана с диаметром зерна материала, характеристикой критической пластичности и критическим раскрытием в вершине трещины на пределе выносливости. Предложенные аналитические зависимости могут быть использованы для оценки остаточного ресурса и предела выносливости сварных конструкций, влияния различных факторов на предел выносливости сварных соединений феррито-перлитных сталей, используемых в машиностроении, судостроении, трубопроводном транспорте и др.

Ключевые слова: сварное соединение, феррито-перлитная сталь, длина трещины, предел выносливости, критическая деформация, математическая модель, структурное повреждение.

Для цитирования: Молоков, К. А. Аналитическая модель оценки предела выносливости сварных соединений феррито-перлитных сталей / К. А. Молоков, В. В. Новиков, А. П. Герман // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 225−234. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-225-234

© Молоков К. А., Новиков В. В., Герман А. П. 2020

Analytical model for assessing fatigue limit of welded joints of ferritic-pearlitic steels

K. A. Molokov, V.V. Novikov, A. P. German
Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Introduction. Microdefects and zones with stress concentration in welded joints cause fatigue macrocracks. Such damage is potentially dangerous, especially if the fatigue life of the structure is almost exhausted. In this case, the crack size is close to the critical value, and it is crucial to determine its length. The paper considers the development of an engineering analytical model for assessing the critical crack length and endurance limit of welded joints with the formed grain in the structure of ferrite-pearlitic steels after welding.
Materials and Methods. The theory and methods of fracture mechanics at the mesoscale are used. A simple analytical dependence is obtained, which provides determining the critical dimensions of a macrocrack for ferrite-pearlite steels without using the Griffiths formula. . The calculation results of the critical crack lengths of various steels depending on their yield strength are presented. An analytical dependence of the endurance limit calculation for the most dangerous symmetric loading cycle, according to the standard set of mechanical characteristics and the average grain diameter of ferrite-pearlite steel, is presented.
Results. Structural deformation analysis of the crack propagation process has been performed. On its basis, an engineering technique for assessing the endurance limit is developed. A mathematical model that enables to calculate the endurance limit and the critical crack length in the components of welded assemblies of large-sized facilities, considering periodic loads of a symmetrical cycle, is developed. Using this model, it is possible to estimate the degree of metal sensitivity to the original characteristics (yield stress, Poisson's ratio, grain diameter, relative constriction, Young's modulus, power-law hardening coefficient, etc.).
Discussion and Conclusion. Under stresses corresponding to the steel endurance limit, the critical crack opening rates of the tip and edges approach each other. Energetically, this moment approximately corresponds to the transition of the crack to an unstable state. The accumulation of one-sided plastic deformations causes the limiting state of plasticity of the region adjacent to the crack tip and its avalanche-like or sharply accelerated motion. This critical area is interrelated with the grain diameter of the material, the characteristic of critical plasticity and the critical opening at the crack tip at the fatigue limit. The proposed analytical dependences can be used to assess the residual life and the fatigue limit of welded structures, the influence of various factors on the fatigue limit of welded joints of ferrite-pearlitic steels used in mechanical engineering, shipbuilding, pipeline transport, etc.

Keywords: welded joint, ferritic-pearlitic steel, crack length, endurance limit, critical deformation, mathematical model, structural damage.

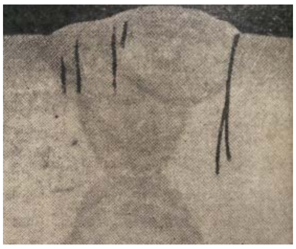
For citation: K. A. Molokov, V.V. Novikov, A. P. German. Analytical model for assessing fatigue limit of welded joints of ferritic-pearlitic steels. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 225−234. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-225-234

Введение. Микродефекты и зоны с концентрацией напряжений в сварных соединениях обусловливают появление усталостных макротрещин. Подобные повреждения потенциально опасны, особенно если ресурс усталостной прочности конструкции практически исчерпан. В этом случае размер трещины близок к критическому значению, и крайне важно определить ее длину. Статья посвящена разработке инженерной аналитической модели для оценки критической длины трещины и предела выносливости сварных соединений с образовавшимся зерном в структуре феррито-перлитных сталей после сварки.

Следует отметить, что сварное соединение, равнопрочное для статического нагружения, не гарантирует его надежности при циклических нагрузках. Это обусловлено локальными пластическими деформациями в местах концентрации напряжений в прерывистых связях конструкций, подверженных циклическим нагрузкам [1]. Можно предположить, что для пластичных материалов максимальные напряжения в этих зонах будут постоянными и равными пределу текучести, если пренебречь некоторым упрочнением материала в местах концентрации напряжений и принять, что области возмущенных напряжений относительно малы по сравнению с толщиной материала [2].

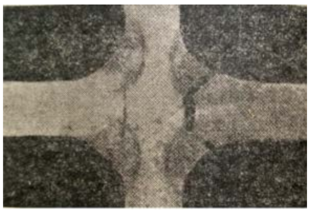
Материалы и методы. Предел выносливости конструкционных сталей приближенно соответствует значениям $\sigma_{-1} = 0{,}5 \ldots 0{,}7\sigma_т$, а разрушение при циклических напряжениях, как правило, происходит локально в виде трещин, берущих начало от концентраторов напряжений или дефектов сварного соединения (рис. 1).

http://vestnik-donstu.ru

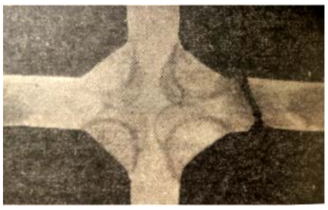


а)

б)



в)



г)

Рис. 1. Трещины в месте подреза и в шве: (*а*, *б*) разрушения крестовых соединений от трещины при неполном проплавлении; (*в*) и в зоне термического влияния (ЗТВ); при полном проплавлении (*г*) [2]

Концентрация напряжений, возникшая в результате недостаточного проплавления при формировании сварного соединения, также может играть решающую роль в образовании слабых зон. Этому способствуют значительная неоднородность механических характеристик, серьезные дефекты шва и околошовной зоны.

В угловых и тавровых соединениях (с разделкой кромок или без нее) в большинстве случаев трещина начинается от концентратора напряжений (рис. 1 *в*, *г*). Если шов выпуклый, разрушение может происходить по зоне сплавления или вблизи нее — по основному металлу в ЗТВ, структура которого претерпела изменения [3].

С течением времени микродефекты приводят к возникновению усталостных трещин [4, 5]. Такие трещины в сварных соединениях некоторых элементов распространяются медленно, поэтому могут быть не особо опасны. Об этом свидетельствует практика использования современных марок сталей для корпусов судов [6]. В то же время усталостные трещины потенциально опасны в двух случаях.

1. Если практически исчерпан ресурс, обеспечиваемый статической неопределимостью конструкции и другими факторами.

2. Если размер трещины соответствует Гриффитсовой критической длине в бесконечной пластине $L|_{\sigma_{-1}} = L_c$, определяемой зависимостью:

$$L = (K_{1c}/\sigma_{-1})^2/\pi, \qquad (1)$$

где K_{1c} — критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации в вершине трещины; σ_{-1} — напряжение предела выносливости материала; L — половина длины сквозной тещины.

Коэффициент K_{1c} может быть рассчитан на базе стандартного набора механических характеристик и среднего диаметра зерна феррито-перлитной стали согласно [7] для плоской деформации и по [8] для плосконапряженного состояния. Однако, чтобы найти критическую длину трещины предела выносливости, необходимо знать величину σ_{-1}.

Механизм влияния среднего диаметра зерна стали в момент начала перехода трещины в лавинообразное продвижение, вероятно, отличается от механизма, контролирующего ее продвижение на стадии образования. Такие предположения, основанные на результатах исследований [7, 9–11], обусловливают более подробное рассмотрение процессов, контролирующих окончание стадии стабильного развития макротрещины при напряжениях, равных пределу выносливости. Его при критических размерах трещины не сложно определить по (1), если найти закономерности влияния структуры, пластических свойств и механических характеристик материала на размер критической трещины.

Цель данного исследования — разработка аналитических зависимостей, позволяющих установить взаимосвязь между критической длиной трещины при напряжениях σ_{-1}, механическими характеристиками феррито-перлитной стали и средним диаметром зерна в структуре металла. Задача — довести полученные зависимости до инженерных формул, позволяющих оценивать предел выносливости феррито-перлитных сталей.

Результаты изучения процесса трещинообразования при высоких номинальных напряжениях свидетельствуют о дискретном, скачкообразном их развитии [12]. Такой характер роста демонстрирует моделирование на окончательной стадии разрушения [7] при нагрузке, соответствующей пределу

выносливости. Это говорит о том, что после накопления односторонней пластической деформации пластическое деформирование сдерживается, если к вершине трещины примыкают большие объемы материала с фрагментированной структурой.

Результаты исследования. При высокой плотности дислокаций, создающих фрагментированную структуру, примем условия плоской деформации в вершине трещины. Дополнительные условия будут обеспечиваться за счет стеснения и набранной односторонней пластической деформации под циклическими нагрузками. Запишем постулаты для момента, когда $L = L_{\text{кр}}$, $\sigma = \sigma_{-1}$.

1. Односторонняя пластическая деформация достигает критической величины в вершине трещины.

2. Фрагментация (ячеистость) структуры феррито-перлитного материала предельна (находится на втором уровне).

3. Функция разности раскрытия берегов и вершины трещины имеет перегиб в точке, близкой к состоянию, когда $L = L_{\text{кр}}$, $\sigma = \sigma_{-1}$.

Из экспериментальных данных следует, что циклическое нагружение металлов вызывает значительное изменение структуры, субструктуры и влияет на все особо чувствительные характеристики. Например, увеличение числа циклов нагружения циклически упрочняющихся (или разупрочняющихся) металлов способствует повышению (или понижению) твердости (прежде всего на поверхности исследуемых образцов) [13, 14].

Результаты упругопластического анализа пластических зон в вершине трещины, определенные по модели Панасюка-Дагдейла [15], существенно отличаются от реальных для материалов с показателем упрочнения $m > 0{,}05$. Тем не менее будем считать, что при небольших номинальных напряжениях $\sigma_{\text{н}} = \sigma_{-1}$ раскрытие в вершине трещины δ и отношение δ/r_p могут быть определены достаточно точно для случая плоской деформации по формулам [16]:

$$\delta = 8\sigma_{\text{т}} \cdot L/pi/E \cdot \ln\sec[\pi\sigma_{\text{н}}/2/\sigma_{\text{т}}], \quad (1)$$

$$\delta/r_p = \frac{8e_{\text{т}} \ln\sec(\pi\sigma_{\text{н}}/2)}{\pi(\sec(\pi\sigma_{\text{н}}/2)-1)}, \quad (2)$$

где r_p — линейный размер пластической зоны на продолжении трещины от ее вершины (рис. 2); $e_{\text{т}}$ — деформация предела текучести.

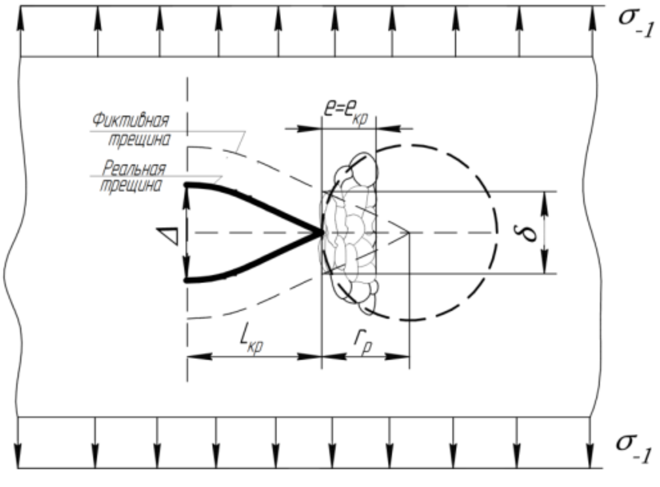


Рис. 1. Состояние металла в вершине критической трещины нормального отрыва под напряжениями предела выносливости

Оценим раскрытие берегов этой трещины при номинальных напряжениях ниже предела пропорциональности, допуская некоторую погрешность [16]:

$$\Delta = \frac{4\sigma_{\text{н}}L}{E}. \quad (3)$$

После дифференцирования разницы между δ и Δ находим, что напряжения, соответствующие моменту ускоренного сближения δ и Δ, будут соответствовать номинальным, определяемым по выражению:

$$\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\text{т}}/2. \quad (4)$$

При значительных пластических деформациях структура материала претерпевает фрагментацию в вершине трещины, поэтому величина $e_{\text{кр}}$ связана со стадийностью и способностью к деформированию фрагментированной структуры. По А. М. Глезеру [17], граница между макропластической и мегапластической деформациями условна, находится на уровне относительной деформации, равной стопроцентной, или истинной. При этом значение критической деформации:

$$e_{кр} \approx 1. \tag{5}$$

А. Н. Балахнин[1] отмечает, что самоорганизация структуры с образованием ячеек (рис. 3) начинается уже при деформации феррита стали 09Г2С и при среднем значении степени холодной деформации ε 15–35%.

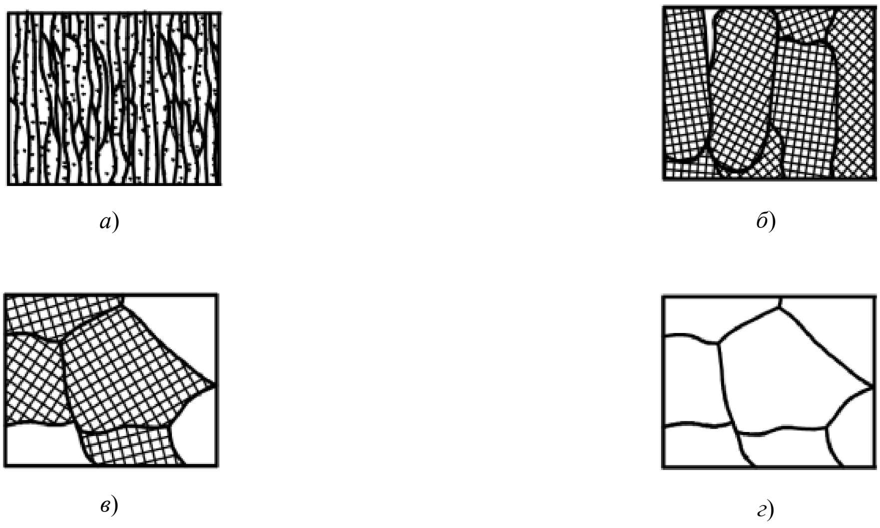


Рис. 3. Микроструктура при пластической деформации: ε = 80 % (*а*), ε = 40 % (*б*), ε = 1 % (*в*), ε = 0 % (*г*) [11]

При дальнейшем увеличении деформации происходит утонение стенок ячеек и уменьшение их размера. Фрагменты приобретают вытянутую форму, зерна вытягиваются в направлении пластического течения (рис. 3).

При критическом раскрытии трещины в области, примыкающей к вершине, на модели фиктивной трещины структура зерен должна стать вытянутой, перейти в предскольное состояние (рис. 3 *а*). Она, вероятно, будет сформирована за счет сдерживания подтока новых дислокаций и перехода их через границы зерен. Материал в данной области должен быть в состоянии предельной критической пластичности, а линейная характеристика его фрагментов — на втором фрагментарном уровне. Очевидно, что в примыкающей зоне пластичности у трещины также должно быть некоторое количество зерен в их предельном пластическом состоянии.

Итак, зона может быть образована за счет накопления части односторонней пластической деформации, охватывающей практически все стадии развития трещины. Однако наиболее существенный вклад в увеличение такой деформации вносится на окончательной стадии разрушения, когда область пластичности велика не только по отношению к длине трещины, но и к линейной характеристике структуры металла. В этой зоне зерна имеют вытянутую форму в виде продолговатой рисинки с размером поперечного сечения $d_к$.

Отнесем средний диаметр зерна недеформированного материала d_z к $d_к$. Тогда для второго фрагментарного уровня:

$$d_z/d_к \cong 1/0{,}618/0{,}618 = 2{,}618, \tag{6}$$

где $d_к$ — диаметр фрагмента.

Не трудно заключить, что для этого состояния пластическая деформация может быть определена по зависимости максимального равномерного удлинения [3, 14]:

$$e_{кр} = 2\,ln(d_z/d_к) \cong 2. \tag{7}$$

Для этого же состояния критическая пластическая деформация на испытываемом образце в шейке при разрыве выражается известной зависимостью:

$$e_{кр} = k_н \cdot ln\left(\frac{1}{1-\varphi_к}\right), \tag{8}$$

где $k_н$ — коэффициент нормирования, введенный авторами для перехода от структуры в критическом пластическом состоянии к значению критической пластической деформации образца при разрыве.

Найдем этот коэффициент через относительное (критическое) сужение образца при разрыве, приравняв (9) к (8). Тогда с учетом (6) критическая пластическая деформация определяется по выражению:

$$e_{кр} = 2 = ln\frac{1}{1-\varphi_к} + ln\frac{1}{1-\varphi_к} = 2\,ln\frac{1}{1-\varphi_к}\,. \tag{9}$$

Для критического раскрытия в вершине трещины структурно-деформационный критерий можно выразить:

[1] Балахнин А. Н. Формирование структуры и свойств закаленных конструкционных низкоуглеродистых сталей при холодной радиальной ковке и последующем термическом воздействии : дис. … канд. тех. наук. Пермь, 2015. 158 с.

$$\delta_{кр} = d_з e_{кр} = 2d_z\, ln\left(\frac{1}{1-\varphi_к}\right). \quad (10)$$

В результате влияния критического поперечного сужения $\varphi_к$ на коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации K_{1c} для высокопрочных сталей отмечены [18]:

— значительный разброс значений K_{1c} и $\varphi_к$;

— удовлетворительная корреляция между ними.

При этом заключается, что взаимосвязь K_{1c} и $\varphi_к$ можно применять только как качественную. С такими выводами можно согласиться, но только если отбросить взаимосвязь с некоторыми другими структурными характеристиками, например средним диаметром зерна стали и пр.

Для нахождения искомой зависимости подставим (5) в (2). Полученное выражение приравняем к (11) и запишем его относительно L. В результате выкладок получим критическую длину макротрещины для номинальных напряжений, равных пределу выносливости при наиболее опасной асимметрии цикла:

$$L_{кр}\Big|_{\sigma_н=\sigma_{-1}} = 0{,}3607\frac{\pi\cdot E}{\sigma_т}2d_z\ln\left(\frac{1}{1-\varphi_к}\right). \quad (11)$$

Из этого следует, что длина критической трещины прямо пропорциональна величине критической логарифмической пластической деформации $e_{кр}$ стали и обратно пропорциональна деформации текучести $\sigma_т/E$. Преобразовав численную постоянную, (12) можно записать в виде:

$$L_{кр}\Big|_{\sigma_н=\sigma_{-1}} = 0{,}7214\frac{\pi\cdot d_z\cdot e_{кр}}{\varepsilon_т}. \quad (12)$$

Используя эмпирическую зависимость сопротивления микросколу зерна $R_{Мс} = \sigma_в/(1-\varphi_к^2)$, справедливую для группы феррито-перлитных низкоуглеродистых сталей, находим средний диметр зерна:

$$d_z = [5{,}7(1-\varphi_к^2)/\sigma_в]^2. \quad (13)$$

Здесь $\sigma_в$ — предел прочности стали. Подставляя d_z в (13), можно получить искомую простую формулу для оценки $L_{кр}$, в которую входят только основные характеристики материала.

Для вычисления предела выносливости симметричного цикла достаточно приравнять (12) к (1). Чтобы найти K_{1c}, воспользуемся выводом, полученным в [7]. Окончательная формула для расчета K_{1c} при условиях плоской деформации в вершине трещины строго математически имеет вид:

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{\pi\, 0{,}618\, d_z}{[{\sigma_т}^{1/m-1}\cdot(1-2\mu)^2\,]/2}\left(\frac{R_{Mce}\cdot D}{q}\right)^{1/m+1}}\,. \quad (14)$$

Здесь R_{Mce} — сопротивление микросколу деформированного металла, которое для класса феррито-перлитных сталей составляет $R_{Mce} = 1{,}618R_{Mc}$; R_{Mc} — сопротивление микросколу ферритного зерна; m — коэффициент (показатель) степенного упрочнения материала; q — коэффициент перенапряжения, равный для данного случая $1-2D/\sqrt{3}$; μ — коэффициент Пуассона. D — коэффициент, который учитывает повышение первого главного напряжения в случае сложного напряженного состояния. Для плоской деформации он принимает значение $(1+m)(1-2\mu)/2$.

Сопротивление микроскола зерна вычисляется по классической зависимости $R_{Mc} = 5{,}7/\sqrt{d_z}$ для скола ферритного или феррито-перлитного зерна. Выполнив подстановку (15) со всеми составляющими из (12) в (1), получаем окончательное значение предела выносливости в зависимости от стандартного набора механических характеристик материала и среднего диаметра зерна:

$$\sigma_{-1} = \sqrt{\frac{1{,}091\left(\frac{4{,}611\cdot(1-2\mu)(m+1)}{\sqrt{d_z}}\right)^{1/m+1}\cdot{\sigma_т}^{2-1/m}}{E(2\mu-1)^2\cdot e_{кр}\left(\frac{\sqrt{3}\cdot(2\mu-1)(m+1)}{3}+1\right)^{1/m+1}}} \quad (15)$$

Если значение среднего диаметра зерна d_z неизвестно, его можно вычислить по (14).

Результаты численного тестирования предела выносливости показывают, что зависимость (16) «чувствительна» к некоторым характеристикам материала. Например, варьирование значения коэффициента Пуассона в сотых долях может изменить результат в $\sqrt{2}$ раз. Вероятно, такая погрешность расчетов связана с особенностью используемых моделей и принятыми допущениями при выводе (16).

Проверим адекватность предложенной аналитической модели на примере группы феррито-перлитных сталей (таблица 1).

http://vestnik-donstu.ru

Таблица 1

Основные экспериментальные и расчетные характеристики сталей

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	μ	m	$\varphi_к$	$d_з$, мкм	K_{1c}, МПа	σ_{-1}, МПа
Сталь 10	190	320	0,3	0,17	0,73	66	103,6	135,4[1]
Ст3сп	270	450	0,3	0,16	0,71	37	101	192[1]
22К	310	540	0,3	0,16	0,69	30	97	220[1]
Сталь 50	350	680	0,3	0,16	0,62	25	78	247[1]
37ХН3А	743	1014	0,26	0,12	0,6	14[3]	73	480[1]
15Г	280	490	0,29	0,156[1]	0,65	45[4]	–	230
09Г2	300	440	0,29	0,16	0,69	33	–	235
30ХГСА	1360	1750	0,26	0,13[2]	0,44	7[4]	–	490
16Г2АФ	417	600	0,29	0,16	0,5	22	–	255
10ХСНД	390	540	0,29	0,132[2]	0,71	27[4]	–	284

[1] Значения получены расчетом [7].

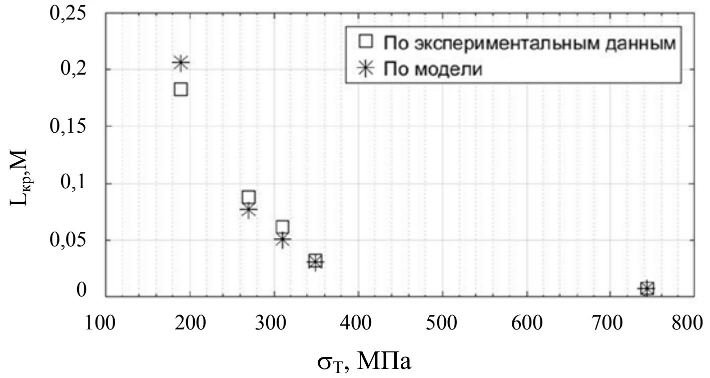
[2] Расчет по зависимости $m = \left\{0{,}75 \cdot lg\left[\sigma_в(1 + 1{,}4\varphi_к)/\sigma_{0,2}\right]\right\}/lg\left[10^5 \cdot ln\left(\frac{1}{1-\varphi_к}\right)/\left(200 + 0{,}5\sigma_{0,2}\right)\right]$ [2].

[3] Вычислено по данным сопротивления микроскола недеформированного материала.

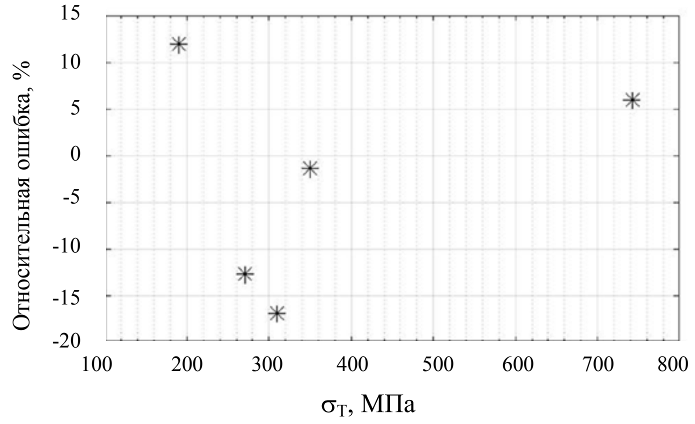
[4] Расчет по зависимости (14).

Для сопоставления результатов, полученных по (12), находим критические длины трещин по экспериментальным данным и с учетом формулы (1). Пределы выносливости рассчитываем при условии плоской деформации по методу [7], который учитывает средний диаметр зерна, коэффициент упрочнения m и другие механические характеристики, существенно влияющие на предел выносливости.

На рис. 4*а* представлены значения критических длин сквозных трещин на пределе выносливости для сталей с разными пределами текучести. Расчетные величины по (12) сопоставлены с экспериментальными данными. Сравнение показало достаточно хорошее согласование для феррито-перлитных сталей разной прочности, несмотря на принятые многочисленные допущения (рис. 4 *б*).



а)



б)

Рис. 4. Значения критических длин трещин сталей в зависимости от предела текучести (*а*) и относительная погрешность модели (*б*)

На рис. 5 показаны результаты сравнения предела выносливости симметричного цикла по (16) для группы сталей (таблица 1) с экспериментальными и известными расчетными значениями.

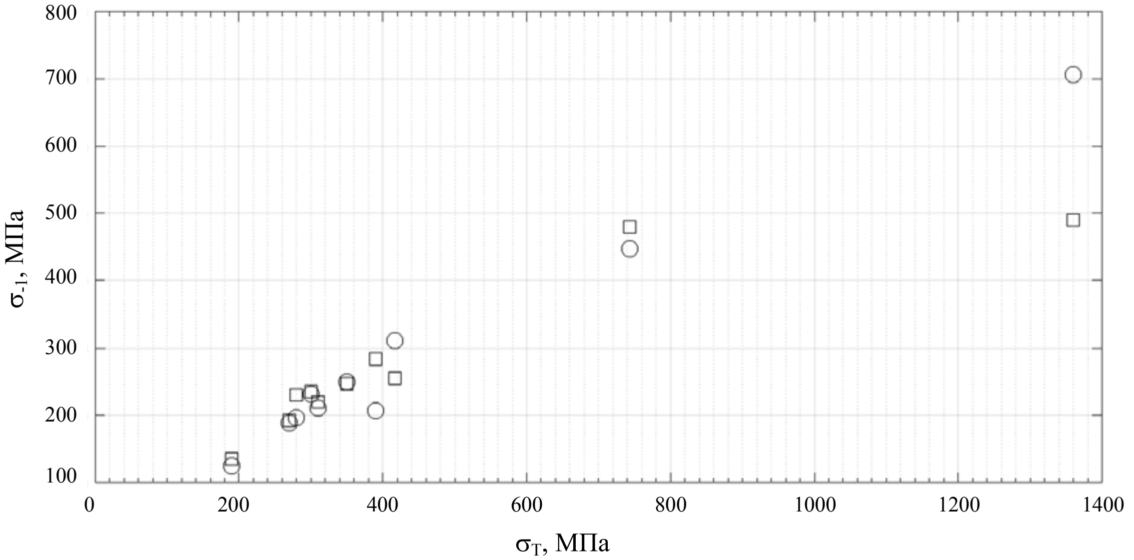


Рис. 5. Сравнение пределов выносливости симметричного цикла и пределов текучести: ○ — расчет по модели (16); □ — известные данные (таблица 1)

По результатам сравнительного анализа можно сделать выводы.

1. Чем прочнее сталь, тем больше сказывается «чувствительность» (16) к исходным данным и растет погрешность расчетов.

2. Для феррито-перлитных сталей с $\sigma_т < 400$ МПа результаты расчета пределов выносливости удовлетворительно согласовываются с исходными данными таблицы 1.

Зависимость (16) обладает высокой «чувствительностью» к некоторым исходным параметрам, поэтому на данном этапе исследования невозможно более точно оценить результаты.

При приближении длины трещины к критическому значению $L_{кр}$ она начинает расти скачкообразно. Поэтому детерминистическая модель не может точно определить, через сколько циклов закончится такое развитие трещины, и она распространится со скоростью звука. Средний диаметр зерна материала может значительно различаться в зонах сварных конструкций — например, в ЗТВ и материале, на который не повлияла сварка. Следует учесть, что стадия развития макротрещины на воздухе для элементов крупногабаритных деталей без концентраторов напряжений занимает по времени почти 20%. В связи с этим при определении $L_{кр}$ относительную погрешность до ~15% можно считать положительным результатом. В рамки этой погрешности попадает период так называемого «циклического долома» [11], где для низких циклических усталостных напряжений ~1/10 часть остаточного ресурса соответствует возрастанию длины трещины примерно в два раза.

Таким образом, предложенные на основе критериев структурно-деформационного анализа аналитические зависимости могут быть использованы в расчетах предела выносливости судовых и других крупногабаритных конструкций.

Обсуждение и заключение. Для безопасной эксплуатации морских судов необходима актуальная и адекватная информация о состоянии конструкций корпуса, в том числе о металлургических дефектах и конструктивных концентраторах напряжений. Важны оценка остаточного ресурса и, соответственно, определение критических размеров усталостных трещин. В вершине критической развивающейся макротрещины при напряжениях, соответствующих пределу выносливости, накапливается односторонняя пластическая деформация, которая снижает пластичность сильно фрагментированной зоны. При этом количество циклов остаточного ресурса остается незначительным и сильно зависит от предела текучести, дефектов, диаметра зерна стали конструкции, в которой развивается трещина.

В результате исследования установлено, что при напряжениях, соответствующих пределу выносливости стали, сближаются скорости раскрытия критической трещины вершины и берегов. Этот момент энергетически примерно соответствует переходу трещины в нестабильное состояние. Накопление односторонних пластических деформаций приводит к предельному состоянию пластичности области, примыкающей к вершине трещины и лавинообразному или резко ускоренному ее движению. Эта критическая область взаимосвязана с диаметром зерна материала, характеристикой критической пластичности и

критическим раскрытием в вершине трещины на пределе выносливости.

Полученные аналитические зависимости позволяют с учетом среднего диаметра зерна феррито-перлитной стали и критического сужения рассчитывать предел выносливости наиболее опасного цикла нагружения по классической Гриффитсовой взаимосвязи между длиной трещины, напряжениями и коэффициентом интенсивности напряжений.

Предложенные математическая модель и подход на основе критериев структурно-деформационного анализа могут быть использованы в инженерных расчетах машиностроительных, судовых конструкций и их соединений для оценки эксплуатационного ресурса.

Библиографический список

1. Казанов, Г. Т. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций / Г. Т. Казанов, В. В. Новиков, Г. П. Турмов. — Владивосток : Изд-во ДВФУ, 2014. — 178 с.

2. Молоков, К. А. Основы расчетного проектирования сварных конструкций. Том 1. Напряженное состояние и основы конструирования / К. А. Молоков, В. В. Новиков, Г. П. Турмов. — Владивосток : Изд-во ДВФУ, 2019. — 204 с.

3. Ямалеев, К. М. Структурные аспекты разрушения металла нефтепроводов / К. М. Ямалеев, Л. Р. Гумерова. — Уфа : Гилем, 2011. — 144 с.

4. Jordan, C. In-Service Performance of Structural Details / C. Jordan, C. Cochran. — Washington: Ship Structure Committee, 1978. — 188 p.

5. Akita, Y. Statistical Trend of Ship Hall Failure / Y. Akita // PRADS, 83: the Proceedings of the 2nd International Symposium on Practical Design in Shipbuilding in Tokyo and Seoul, October 17–22. — Tokyo: Society of Naval Architects of Japan, 1983. — P. 619–624.

6. Повреждения и расчетный анализ прочности корабельных конструкций / В. В. Новиков, Г. П. Турмов, О. Э Суров [и др.]. — Владивосток : Изд-во ДВФУ, 2020. — 266 с.

7. Матохин, Г. В. Основы расчетных методов линейной механики разрушения / Г. В. Матохин, К. П. Горбачев. — Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2008. — 304 с.

8. Молоков, К. А. Оценка выносливости сварных соединений с учетом общего пластического деформирования материала при плоском напряженном состоянии / К. А. Молоков // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2019. — № 1 (38). — С. 19–26.

9. Файвисович, А. В. Кинетика геометрии макротрещины / А. В. Файвисович, И. Г. Береза // Эксплуатация морского транспорта. — 2019. — № 1 (90). — С. 77–83.

10. Федотов, С. Н. Квазихрупкое разрушение как разрушение иерархической структуры / С. Н. Федотов // Физическая мезомеханика. — 2015. — Т. 18, № 6. — С. 24–31.

11. Терентьев, В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева. — Москва : Наука, 2015. — 479 с.

12. Иванова, В. С. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов / В. С. Иванова. — Уфа : Изд-во УГНТУ, 1998. — 363 с.

13. Иванова, В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. — Москва : Металлургия, 1975. — 454 с.

14. Кроха, В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации / В. А. Кроха. — Москва : Машиностроение, 1980. — 157 с.

15. Поля деформаций при малоцикловом нагружении / С. С. Сергисен, Р. М. Шнейдорович, Н. А. Махутов [и др.]. — Москва : Наука, 1979. — 277 с.

16. Куркин, С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением / С. А. Куркин. — Москва : Машиностроение, 1976. — 184 с.

17. Основы пластической деформации наноструктурных материалов / Под ред. А. М. Глезера. — Москва : Физматлит, 2016. — 304 с.

18. Смирнов, А. Н. Разрушение и диагностика металлов / А. Н. Смирнов, В. В. Муравьев, Н. В. Абабков. — Москва ; Кемерово : Инновационное машиностроение, 2016. — 479 с.

Сдана в редакцию 20.04.2020
Запланирована в номер 01.07.2020

Об авторах:

Молоков Константин Александрович, доцент кафедры «Сварочное производство» ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), кандидат технических наук, ResearcherID AAH-6348-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9764-9329, ScopusID: 57197836777, Spektrum011277@gmail.com.

Новиков Валерий Васильевич, доцент кафедры «Кораблестроение и океанотехника» ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5892-815X, ScopusID: 5641710410, leka1551@rambler.ru.

Герман Андрей Петрович, доцент кафедры «Кораблестроение и океанотехника» ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), ResearcherID D-1725-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9530-5258, ScopusID: 56417290300, gerand1@yandex.ru.

Заявленный вклад соавторов

К. А. Молоков — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. В. В. Новиков — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка выводов, корректировка текста. А. П. Герман — работа с источниками, корректировка текста, оформление, подготовка сопровождающих документов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

http://vestnik-donstu.ru